

Konzeption und Herstellung von kunststoffbasierten Mikrotastern

T. Florian, G. Ziegmann, D. Meiners

Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik, TU Clausthal

tamara.florian@tu-clausthal.de

N. Ferreira

Institut für Mikrotechnik, TU Braunschweig

n.ferreira@tu-braunschweig.de

Abstract

Zunehmende Miniaturisierung für die Mikro- und Nanotechnik stellt immer höhere Anforderungen an die dimensionelle Messtechnik. Koordinatenmessgeräte (KMG) sind wesentlicher Bestandteil der Qualitätssicherung der Fertigungsprozesse, z. B. im Automobilbau, Maschinenbau oder in der Luft- und Raumfahrttechnik.

Häufig handelt es sich bei KMGs um taktil arbeitende Messgeräte. Die zum Einsatz kommenden Taster ermöglichen eine kraft- oder auslenkungsgeregelte Positionserfassung. Die Taster zur Erfassung von Mikrostrukturen werden Mikrotaster genannt und bestehen aus einem Kraftsensor und einem meist vertikal ausgerichteten Taststift (Abbildung 1).

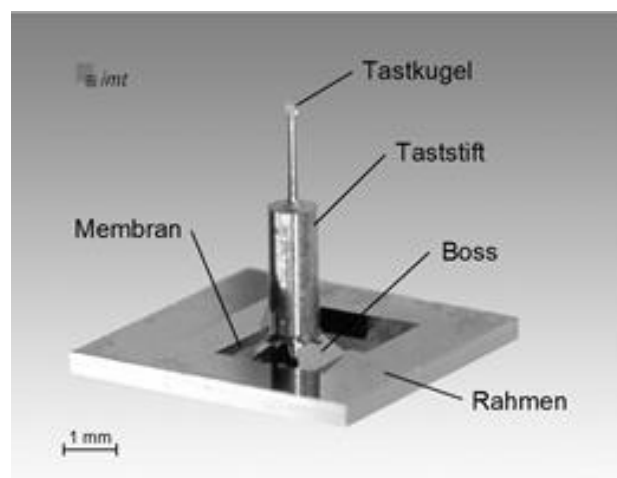


Abb. 1: Am IMT entwickelter Bosstaster

Am Institut für Mikrotechnik der TU Braunschweig (IMT) wurde ein so genannter „Bosstaster“ – ein monolithischer dreidimensionaler Mikrotaster auf der Basis der Silizium-Technologie – entwickelt und gefertigt.

Das bisherige Taststift-System zeichnet sich durch einen sehr hohen Fertigungsaufwand aus, da die Stifte einzeln im Funkenerodierverfahren gefertigt werden. Anschließend folgen zwei Fügeschritte: zum einen zum eigentlichen Tastelement (Rubinkugel $\varnothing 300\text{ }\mu\text{m}$), zum anderen zur Messmembran. Durch den Einsatz des Kunststoffverarbeitungsverfahrens Mikrospritzguss kann eine wirtschaftlichere Fertigung mit einer deutlichen Zunahme der Gestaltungsfreiheit der Taststifte realisiert werden.

Neben der Materialentwicklung sowie der Charakterisierung liegt ein Fokus auf dem Werkzeugkonzept, welches eine präzise Fertigung ermöglicht. Ferner wird die Funktionsfähigkeit des Systems nachgewiesen.

1 Einleitung

Die Koordinatenmesstechnik (KMT) entwickelt sich nunmehr seit 30 Jahren stetig weiter. Ausgehend von der Zielstellung, Werkstücke mit komplexer Geometrie hoch flexibel bei höchster Genauigkeit erfassen zu können, ergaben sich immer neue Aufgabenbereiche, die Anpassungen erfordern [1]. Als ein Beispiel hierfür ist die zunehmende Miniaturisierung der zu vermessenden Komponenten zu nennen.

Der Kontakt zwischen dem zu vermessenden Bauteil und der Koordinatenmessmaschine bei einem Messvorgang wird mit einem Messtaster als Schnittstelle hergestellt. Am IMT wurde zu diesem Zweck ein so genannter „Bosstaster“ – ein monolithischer dreidimensionaler Mikrotaster auf der Basis der Silizium-Technologie – entwickelt und gefertigt [2]. Das System basiert auf dem piezoresistiven Effekt und ermöglicht die Kraft-Weg-Messung an Komponenten mit einer Antastgenauigkeit von 1,7 nm, wodurch es auch für Mikrokomponenten geeignet ist [3,4]. Bislang besteht dieses System aus einer Siliziummembran und einem Taststift aus Wolframcarbid [5]. Dieses Material zeichnet sich durch eine besonders hohe Härte aus, wodurch ein geringer Abrieb am Taster und folglich eine hohe Maßstabilität erzielt wird. Jedoch führt die Materialauswahl zu einer Reihe von Nachteilen. So können beim kontinuierlichen Messen, als Folge der hohen Härte des Tasters, Riefen auf der Oberfläche des Werkstücks entstehen, wodurch der zerstörungsfreie Prüfcharakter, besonders bei weichen Materialien wie z.B. Kupfer oder Kunststoff, nicht immer gegeben ist. Des Weiteren geht mit der hohen Härte eine hohe Sprödigkeit des Materials einher. Somit ist beim unachtsamen

Vermessen von Bauteilen mit einer hohen Ausschussquote durch Brechen der Stifte zu rechnen. Zuletzt ist der wirtschaftliche Nachteil auf Grund des sehr zeitintensiven Herstellungsprozesses zu nennen [6]. Durch das funkenerosive Bearbeiten ergeben sich Stückkosten von ca. 1.800 €.

Die vorgestellten Nachteile können durch den Einsatz von polymeren Werkstoffen und deren Verarbeitungsverfahren gelöst werden. Die relativ komplexe Taststiftgeometrie kann durch die Mikrospritzgieß-Technologie auf Grund der geringen Zykluszeit von < 2 min. und des hohen Automatisierungsgrads wirtschaftlich hergestellt werden [7, 8]. Hierfür sind mehrteilige Präzisionsspritzgießformen notwendig, welche den Anforderungen an die Genauigkeit der Taststifte genügen müssen. Ein weiterer wesentlicher Aspekt für die Funktionsfähigkeit des Systems besteht in der Materialauswahl. Als wesentliche funktionsbeeinflussende Eigenschaften sind hier die Steifigkeit, sowie die Dämpfung und die Kriechneigung des Materials zu nennen, welche wesentlich durch die Auswahl des Basispolymers und der Füllstoffe beeinflusst werden. Ebenso essentiell sind die Verarbeitungseigenschaften, wie z.B. Fließfähigkeit und Abbildungsgenauigkeit des zu entwickelnden Materials. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit des neuen Systems erfolgt auf einer konventionellen Anlage.

2 Materialentwicklung

2.1 Materialien und Methoden

Als Basispolymer wurde Polyphenylensulfid (PPS, Fortron® 0203, Ticona Sulzbach, Deutschland) mit einem Elastizitätsmodul von 4000 MPa verwendet. Als Füllstoff wurden Carbon Nano Fasern (CNF, PR-24 Pyrograph III, carbon NT&F 21, Eisenstadt, Österreich) mit einem Durchmesser von 60-150 nm und einer Länge von max. 30 µm eingesetzt.

Die Compoundierung der Materialien erfolgte bei 300 °C, 50 U/min, t = 15 min in einem Messkneteter (PolyLab Rheomix 600p, ThermoHaake, Thermo Fisher Scientific, Karlsruhe, Deutschland). Anschließend wurde das Material granuliert und zu den jeweiligen Probe-/Formkörpern spritzgegossen (Arburg Allrounder 220S, Arburg, Lossburg, Deutschland).

Die Homogenität der Mischungen wurde anhand von Rasterelektronenmikroskopaufnahmen (CamScan 4, Cambridge Scanning Ltd., Cambridge, Vereinigtes Königreich) sichergestellt.

Die mechanischen Eigenschaften der Compounds wurden in einer Universalprüfmaschine (Z100, Zwick, Ulm, Deutschland) in Kombination mit einer 2 kN Kraftmessdose ermittelt. Die Prüfung erfolgte mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min.

2.2 Ergebnisse und Diskussion

Die CNF wurden der polymeren Matrix in einem Anteil von 2 Gew.-%, 5 Gew.-%, 10 Gew.-% im Laborkneteter zugesetzt. Das Drehmoment steigt von ca. 5 Nm bei der Zugabe des Füllstoffs auf ca. 15-20 Nm und sinkt nach einer kurzen Einarbeitungszeit von ca. 3 min. Anschließend beginnt die Compoundierzeit von 15 min., in welcher sich das Drehmoment bei ca. 7-12,5 Nm einpendelt. Die geringen Schwankungen des Drehmoments nach der Einarbeitungszeit sind ein Zeichen für die homogene Einarbeitung der CNF in die polymere Matrix.

Die Ergebnisse der Drehmomentkurven können durch den Einsatz von REM-Aufnahmen unterstrichen werden. Die in der Polymermatrix vorliegende Verteilung der Füllstoffpartikel ist für die vorliegenden Compounds bei unterschiedlichen Füllgraden in Abbildung 2 dargestellt. Die Bruchflächen des Materials zeigen keinerlei Agglomerate oder Anhäufungen des faserartigen Füllstoffs. Wird die Füllstoffverteilung betrachtet, so steigt die Anzahl der Füllstoffpartikel erwartungsgemäß mit dem Füllstoffanteil.

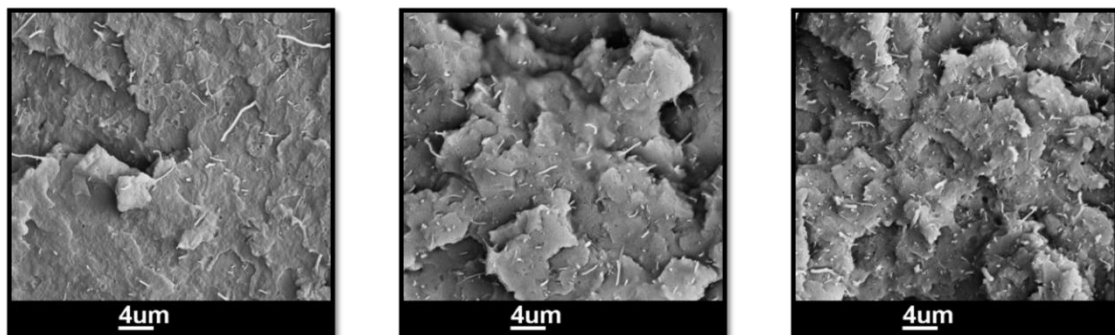


Abb.2: REM-Aufnahmen zur Überprüfung der Homogenität der Materialien; a) PPS + 2 Gew.-% CNF, b) PPS + 5 Gew.-% CNF, b) PPS + 10 Gew.-% CNF; jeweils 2000-fache Vergrößerung

Die Spritzgussverarbeitung der Materialien erfolgte gemäß der in Tabelle 1 dargestellten Parameter. Dabei beziehen sich die Werte A auf die Herstellung der Zugprobekörper und die Werte B auf die Herstellung der Probekörper für die Betrachtung der Abbildungsgenauigkeit. Auf Grund der geringen Viskosität des reinen Polymers können

die Probekörper bei relativ geringem Einspritz- und Nachdruck hergestellt werden. Der Spritzdruck steigt mit steigendem Füllstoffgehalt von 800 bar (bei 0 Gew.-%) auf bis zu 1600 bar (bei 10 Gew.-%) an. Ursächlich hierfür ist der mit dem Füllstoffanteil einhergehende Anstieg der Viskosität.

Tab. 1: Spritzgussparameter für gefülltes und ungefülltes PPS; Werkzeuggeometrie: A) Zugknochen, B) Abbildungsgenauigkeit

	0 Gew.-%	2 Gew.-%	5 Gew.-%	10 Gew.-%
<i>Massetemperatur in °C</i>	320	320	320	320
<i>Fließrate in cm³/s</i>	22	22	22	22
<i>Einspritzdruck in bar</i>	600 _A 800 _B	1000 _A 1200 _B	1000 _A 1400 _B	1000 _A 1600 _B
<i>Nachdruck in bar</i>	400 _A 600 _B	800 _A 1000 _B	800 _A 1200 _B	800 _A 1400 _B
<i>Werkzeugtemperatur in °C</i>	100 _A 140 _B	100 _A 140 _B	100 _A 140 _B	100 _A 140 _B

Im Rahmen des Zugversuchs wurden die typischen Größen Zug-E-Modul, Zugfestigkeit sowie Bruchrechnung der Compounds ermittelt.

Die Zugfestigkeit steigt von ca. 82 MPa bei 0 Gew.-% Füllstoffanteil nur unwesentlich auf ca. 85 MPa (10 Gew.-% CNF) (vgl. Abbildung 3). Der E-Modul hingegen wird durch den Einsatz des Verstärkungsmaterials von ca. 3800 MPa um ca. 40% auf ca. 5500 MPa gesteigert. Die Steigerung des Moduls entspricht den Erwartungen der Literatur [9]. Die Bruchdehnung sinkt von ca. 2% (0 Gew.-%) auf ca. 0,5% (10 Gew.-% CNF) und führt somit im anschließenden Verarbeitungsprozess zu besonderen Herausforderungen bei der Entformung des Materials, da filigrane Strukturen bei der Entformung zum Versagen neigen.

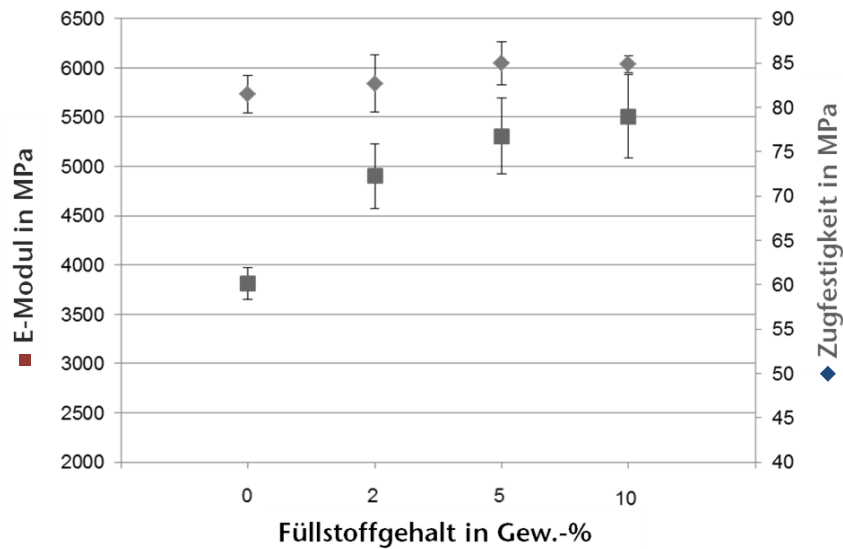


Abb. 3: Abhängigkeit des E-Moduls (Quadrat) und der Zugfestigkeit (Raute) vom Füllstoffgehalt

Der Einfluss der Fließfähigkeit von gefüllten Thermoplastschmelzen auf die Abbildungsgenauigkeit im Spritzgussprozess ist vor allem bei mikrostrukturierten Oberflächen oder bei Mikrobautteilen von großer Bedeutung. Insbesondere bei der Zielstellung, ein hochpräzises Mikrobauteil zu fertigen ist, die Kenntnis dieser Verarbeitungseigenschaft notwendig. Zur Nachweisführung der Abbildungsgenauigkeit wurde mittels des in Abbildung 4 dargestellten mikrostrukturierten Spritzgusswerkzeuges eine Mikrostruktur abgebildet und die Abbildungsgenauigkeit anhand von REM-Aufnahmen überprüft.

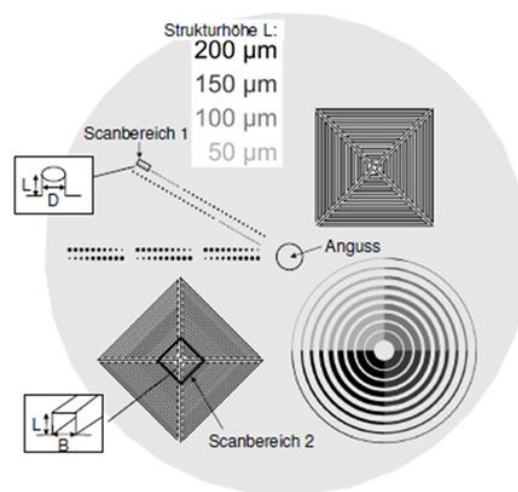


Abb. 4: Schematische Darstellung der mikrostrukturierten Oberfläche; Graustufen veranschaulichten die Strukturhöhe L in μm

Die Betrachtung der Mäanderstruktur mit rechteckigem Querschnitt (Abbildung 5, Scanbereich 2) zeigt eine hohe Abbildungsgenauigkeit der Compounds. Die vorgegebenen Mikrostrukturen mit rechteckigem Querschnitt ($L=200\mu\text{m}$ / $B=100\mu\text{m}$)=2 konnten bis zu einem Füllgrad von 5 Gew.-% vollständig ausgefüllt werden (vgl. Abbildung 5, Aufnahme a und b). Das gleiche Bild zeigt sich bei der Betrachtung des Scanbereichs 1, in welchem zylindrische Strukturen mit einem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis von ($L=200\mu\text{m}$ / $D=100\mu\text{m}$)=2 eingearbeitet sind (vgl. Abbildung 5, Aufnahme c und d). Die Entformung der Probekörper mit 10 Gew.-% CNF war auf Grund der hohen Sprödigkeit des Materials nicht möglich. Es kam zum Versagen der Strukturen in Bereichen mit hohem Aspektverhältnis, so dass keine Aussage zur Abbildungsgenauigkeit getroffen werden kann.

Insgesamt ist eine homogene Oberfläche ohne Riefen, Farbabweichungen etc. zu beobachten, so dass davon ausgegangen werden kann, dass selbst bei hohen Drücken und Scherbelastungen keine Separation der Faser innerhalb des Compounds bei der Verarbeitung und Abbildung von Mikrostrukturen erfolgt.

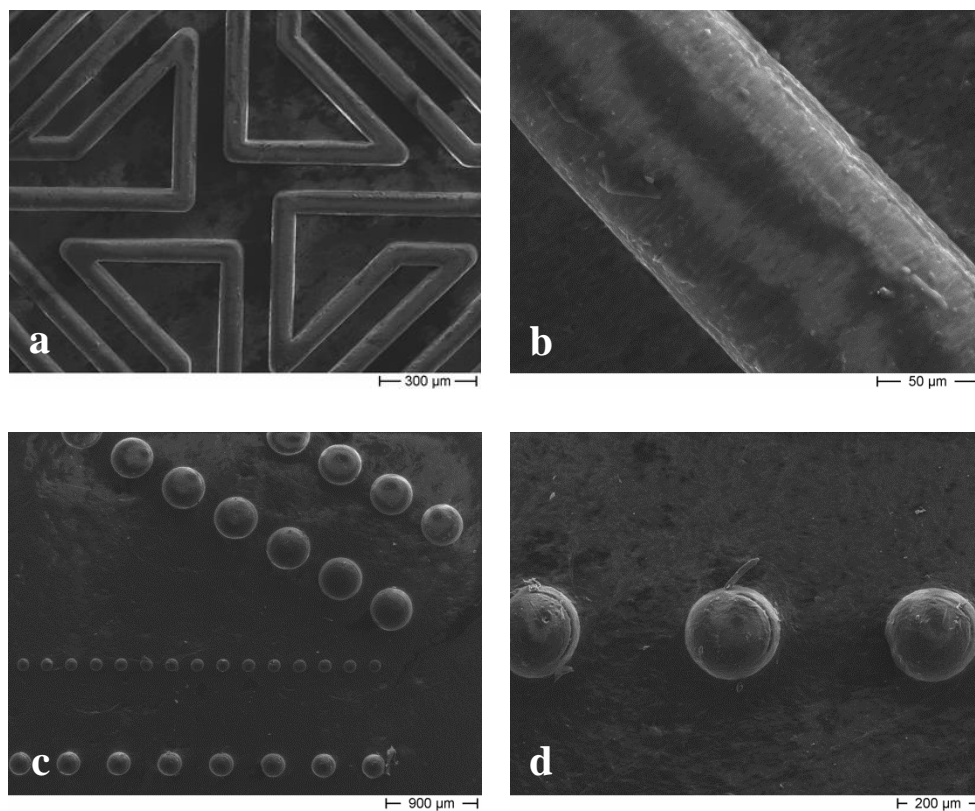


Abb. 5: REM-Aufnahmen von PPS + 5 Gew.-% CNF

3 Taststiftfertigung und Überprüfung der Funktionsfähigkeit

Das entwickelte Materialsystem (PPS + 5 Gew.-% CNF) wurde unter der Verwendung der in Tabelle 3 zusammengefassten Verarbeitungsparameter abgeformt und somit Taststifte für die Überprüfung der Funktionsfähigkeit generiert. Ein Größenvergleich eines Taststifts, sowie eine Detailaufnahme der Antasthalbkugel und des Schafts sind in Abbildung 6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine Abformung der Geometrie bin zur Tasthalbkugel erfolgte und so eine vollständige Werkzeugfüllung ohne Luftein-schlüsse realisiert werden konnte.

Tab. 3: Spritzgussparameter zur Herstellung von Mikrotastern aus PPS + 5 Gew.-% CNF

<i>Parameter</i>	<i>in °C</i>	<i>Parameter</i>	<i>in bar</i>
<i>Massetemperatur</i>	<i>320</i>	<i>Einspritzdruck</i>	<i>1400</i>
<i>Werkzeugtemperatur</i>	<i>140</i>	<i>Nachdruck</i>	<i>1200</i>

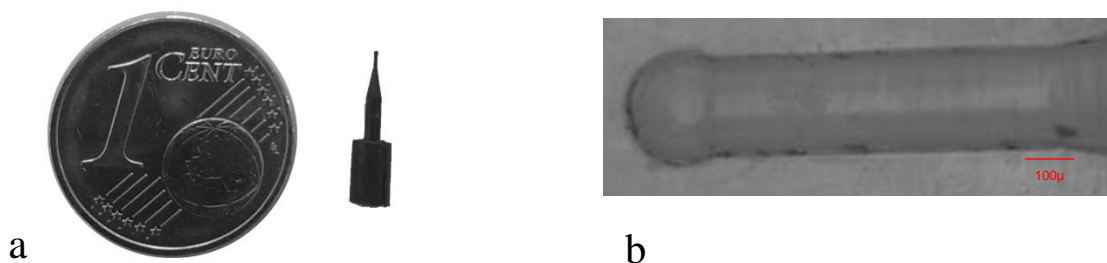


Abb. 6: a) Größenvergleich spritzgegossener Mikrotaster b) Mikroskopische Aufnahme Tastkugel und Teil des Schafts

Die polymeren Tastelemente wurden am Institut für Mikrotechnik auf eine modifizierte Membran montiert und hinsichtlich ihres Verformungsverhaltens (Spannung über Auslenkung) untersucht. Die Ergebnisse zeigen ein sehr sauberes Signal bei der allen drei Antastrichtungen (x, y, z). Exemplarisch sind in Abbildung 7 die Signale der x- und y- Antastrichtung dargestellt. Die Spannung steigt linear mit der Auslenkung an, so dass eine Funktionsfähigkeit des Messsystems gewährleistet ist. Die

Steigung der ermittelten Kennlinie entspricht der Empfindlichkeit, welche durch lineare Regression berechnet werden kann. Es zeigt sich, dass eine ausreichende Auslenkungsempfindlichkeit (beispielsweise z-Richtung 10,965 mV/V/μm) erzielt wird.

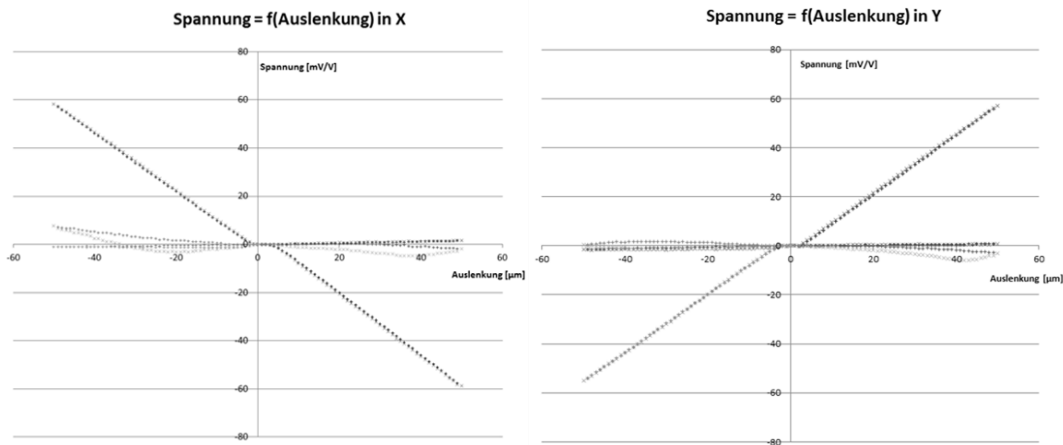


Abb. 7: Darstellung des Verformungsverhaltes CNF gefüllter Mikrotaster in x-Richtung (links) und y-Richtung (rechts)

4 Zusammenfassung

Die Materialentwicklung von nanopartikelgefüllten Thermoplasten für die Herstellung von Mikrotaststiften zum Einsatz in der dreidimensionalen Messtechnik wurde erfolgreich umgesetzt. Durch die Einarbeitung von Carbon Nanofasern in einer Polyphenylsulfidmatrix konnte die Steifigkeit des Systems signifikant um ca. 40% gesteigert werden. Die Homogenität der Mischungen, sowie die Abbildungsgenauigkeit des Materials wurden anhand von REM Aufnahmen (vgl. Abbildung 2 und 5) nachgewiesen. Das entwickelte Materialsystem wurde im Mikrospritzgussverfahren erfolgreich verarbeitet.

Durch die Kombination des polymeren Taststiftes und einer modifizierten Siliziummembran konnten die Funktionsfähigkeit des Systems nachgewiesen werden. Hierbei wurde gezeigt, dass die Spannung linear mit der Auslenkung steigt und somit ein verwertbares Signal gegeben ist.

Es ist ein Messsystem entstanden, welches durch den Einsatz eines effizienten Fertigungsprozesses, welcher zusätzlich eine hohe Geometriefreiheit aufweist, eine signifikante Kostenreduktion ermöglicht.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung des Projektes ZI 648/22-1.

Literaturverzeichnis

- [1] Weckenmann, A.; Beetz, S.: Die Koordinatenmesstechnik stellt sich künftigen Anforderungen - Analyse und Ausblick. GMA Tagung Koordinatenmesstechnik - Innovative Entwicklungen im Fokus der Anwender (15.-16.11.2005, Braunschweig). In: VDI Berichte 1914. Düsseldorf : VDI, 2005, p. 1-15. - ISBN 3-18-091914-0.
- [2] Tibrewala A., Phataralaoha A., Büttgenbach S.: Analysis of full and cross-shaped boss membranes with piezoresistors in transversal strain configuration. Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 18, No. 5, 2008
- [3] Krah T., Büttgenbach S.: Silicon styluses for the Use in Micro Metrology. 6th International Workshop on Microfactories, 2008
- [4] Tibrewala A., Phataralaoha A., Büttgenbach S.: Simulation, fabrication and characterization of a 3D piezoresistive force sensor. Sensors and Actuators A 147, S. 430 – 435, 2008
- [5] Phataralaoha A. Entwicklung piezoresistiver taktiler Sensoren für die Charakterisierung von Mikrokomponenten. Dissertation, TU Braunschweig, 2009
- [6] Schoth A., Förster R., Menz W.: Micro wire EDM for high aspect ratio 3D microstructuring of ceramics and metals. Microsystem Technology 11, S. 250 – 253, 2005
- [7] Majmundar R.B., Asthana A., Ghumman B.S. and Barry C.M.F.: Comparison of predicted and experimental filling of micromolded parts. Antec 2005, 2005: p. 4750.
- [8] Srirojpinyo C., Yoon S., Lee J., Sung C., Mead J.L., Barry C.M.F.: Effects of Materials while Injection Molding Nano-Scale features. Antec, 2004: p. 743-747.
- [9] Wypich, G.: Handbook of fillers. ChemTec Publishing, 2010. ISBN 978-1-895198-41-6

Autorenanschriften

Dip. Ing. (FH) Tamara Florian

Technische Universität Clausthal

Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik

Agricolastraße 6

38678 Clausthal-Zellerfeld

Telefon: 05323-722427

Telefax: 05323-722324

E-Mail: tamara.florian@tu-clausthal.de